

О БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

В. К. Кононенко, В. С. Пунтус

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: vkladik@gmail.com

Введение. В настоящее время активно используются белые светодиоды, в основе которых лежат гетероструктуры с длиной волны излучения 430–480 нм и преобразующий это свечение желтый люминофор [1, 2]. Излучение белого светодиода оказывает на человека специфическое воздействие, влияет на секрецию мелатонина и кортизола, вызывает циркадные изменения [3].

Исследования [4, 5] позволили определить специальную функцию спектральной чувствительности фоторецепторов глаза (дополнительно к палочкам и колбочкам) с активным спектром ($\lambda \approx 460$ нм). Активное излучение оказывает то или иное фотохимическое или биохимическое воздействие на глаз человека. Новый тип светочувствительных клеток сетчатки ответственен за регуляцию циркадной (суточной) ритмики жизнедеятельности организма человека («сон-бодрствование»). Циркадные ритмы, протекающие в 24-часовой период, синхронизируются с естественной световой динамикой окружающей среды («день-ночь»).

В настоящей работе рассмотрены спектральные характеристики голубых и белых светодиодов, сделаны оценки светоотдачи используемых люминофоров. Анализ спектров излучения выполнен в рамках модели без правила отбора для нитридных соединений в системе GaN-AlGaIn и GaInN-GaN. Оценки коэффициента биологического действия излучения выполнены при уровне нормировки спектров светодиодов 100 лм и установлено изменение циркадной эффективности излучателей в зависимости от интенсивности гетероструктур и люминофоров.

Спектральные характеристики светодиодов. Коэффициент биологического действия излучателя определяется спектральной циркадной эффективностью $B(\lambda)$ излучения и спектральной чувствительностью глаза для дневного зрения – кривой видности $V(\lambda)$. Величина $B(\lambda)$ учитывает долю излучения, обеспечивающего визуальные (зрительные) функции и оказывающего биологическое действие [6, 7].

Функция видности $V(\lambda)$, учитывающая чувствительность человеческого глаза, имеет стандартный вид:

$$V_1(\lambda) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma_1}\right)^2\right), \quad V_2(\lambda) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma_2}\right)^2\right), \quad (1)$$

где $\lambda_0 = 555$ нм, $\sigma_1 = 54.3$ нм, $\sigma_2 = 66.3$ нм. Суммарный спектр видности $V(\lambda)$ равен $V(\lambda) = V_1(\lambda) + V_2(\lambda)$. Максимум видности составляет 683 лм/Вт.

Функция $B(\lambda)$ учитывает результаты биологического воздействия синего света, приводящего к подавлению секреции мелатонина. Здесь используется представление [8] с учетом функций спектральной чувствительности рецепторов сетчатки. Функция $B(\lambda)$ имеет вид

$$B_1(\lambda) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_{10}}{\sigma_{1b}}\right)^2\right), \quad B_2(\lambda) = 0.34 \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_{20}}{\sigma_{2b}}\right)^2\right), \quad (2)$$

где $\lambda_{10} = 445$ нм, $\sigma_{1b} = 44$ нм, $\lambda_{20} = 513$ нм, $\sigma_{2b} = 33$ нм. Суммарный спектр функции $B(\lambda)$ равен $B(\lambda) = B_1(\lambda) + B_2(\lambda)$.

Для оценки влияния излучения светодиодов на секрецию мелатонина нормируем спектральное распределение интенсивности излучения светодиодов и рассчитаем соответствующий биологический эквивалент. Нормировка спектра излучения определяется из интеграла перекрытия спектральной интенсивности излучения светодиодов $S(\lambda)$ и кривой видности $V(\lambda)$: $S_0 = 683 \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda$. Нормировочное значение S_0 берется обычно 100 лм (за эталон принимается лампа накаливания с цветовой температурой $T_{\text{ц}} = 2800$ К).

Биологический эквивалент излучения светодиода рассчитывается из интеграла перекрытия нормировочного спектра $S(\lambda)$ и функции $B(\lambda)$: $b_{\text{eq}} = \int B(\lambda) S(\lambda) d\lambda$. Спектральный максимум функции $B(\lambda)$ соответствует длине волны $\lambda \approx 464$ нм, значение функции нормировано на единицу. Высокие значения функции $B(\lambda)$ лежат в сине-голубой области спектра светодиодов, что перекрывается с излучением гетероструктур светодиодов. Для эталона (100 %) величина b_{eq} составляет $b_0 = 0.0324$ [7].

Иногда для оценки биологической активности излучения источников вводится относительный коэффициент циркадной эффективности, методика определения которого предложена в ТУ Ильменау [9] и основана на данных фотометрических измерений [10, 11]. В этом случае, очевидно, оценки применения источников по актиничному фактору зависят от нормировки спектрального состава излучения.

Биологическая эффективность излучения светодиодов. При нормировке на 100 лм учтем два участка спектра: излучение гетероструктуры $\alpha S(\lambda)$ и полосу свечения люминофора $\beta s(\lambda)$. Тогда имеем

$$S_0 = \alpha 683 \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda + \beta 683 \int s(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Здесь $S(\lambda)$ и $s(\lambda)$ – единичные (нормированные, относительные) интенсивности спектров. Коэффициенты α и β учитывают соотношение ин-

тенсивностей гетероструктуры и свечения люминофора и характеризуют возбуждение светодиода. Структура и конфигурация светодиодов определяют их эффективность и работоспособность [12]. Спектры гетероструктур и люминофоров зависят от состава квантовых ям [13, 14] и согласования спектров возбуждения [1, 2].

Обозначим $\int S(\lambda)d\lambda = A_1$, $\int s(\lambda)d\lambda = A_2$ и $683\int S(\lambda)V(\lambda)d\lambda = D_1$, $683\int s(\lambda)V(\lambda)d\lambda = D_2$. Пределы интегрирования охватывают спектральные интервалы перекрытия спектров гетероструктур $S(\lambda)$, люминофоров $s(\lambda)$ и видности $V(\lambda)$ соответственно. Таким образом, имеем соотношение $S_0 = \alpha D_1 + \beta D_2$ и эффективность светодиода η (лм/Вт) равна

$$\eta = (\alpha D_1 + \beta D_2) / (\alpha A_1 + \beta A_2). \quad (4)$$

Для расчета биологического эквивалента зададим $\int B(\lambda)S(\lambda)d\lambda = F_1$, $\int B(\lambda)s(\lambda)d\lambda = F_2$. Тогда (относительно b_0)

$$b_{eq} = (\alpha \int B(\lambda)S(\lambda)d\lambda + \beta \int B(\lambda)s(\lambda)d\lambda) / b_0 = (\alpha F_1 + \beta F_2) / b_0. \quad (5)$$

Если излучение гетероструктуры на фоне люминофора не существенно, то $\alpha \approx 0$ и формулы упрощаются для эффективности и биологического эквивалента: $\eta = D_2 / A_2$, $b_{eq} = \beta F_2 / b_0$. При этом из нормировки $S_0 = 100$ лм следует, что $\beta = 100 / D_2$. Иначе

$$\eta = \frac{683 \int s(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int s(\lambda)d\lambda}, \quad b_{eq} = \eta \left(\frac{100}{683} \right)^2 \frac{\left(\int B(\lambda)s(\lambda)d\lambda \right) \left(\int s(\lambda)d\lambda \right)}{b_0 \left(\int s(\lambda)V(\lambda)d\lambda \right)^2}. \quad (6)$$

Наоборот, если свечение люминофора мало и наиболее заметно излучение гетероструктуры, то $\beta \approx 0$ и формулы для эффективности и биологического эквивалента принимают вид: $\eta = D_1 / A_1$, $b_{eq} = \alpha F_1 / b_0$. Из нормировки $S_0 = 100$ лм имеем $\alpha = 100 / D_1$. Наиболее опасное голубое излучение гетероструктуры можно отсеять с помощью фильтров.

Далее, введем коэффициент, учитывающий соотношение интенсивностей люминофора и гетероструктуры: $\gamma(\alpha, \beta) = 100 / D_2 (\beta + \alpha D_1 / D_2)$. Отсюда находим $\eta = 100 / \gamma(\alpha, \beta) (\beta A_2 + \alpha A_1)$ и биологический эквивалент $b_{eq} = (\alpha F_1 + \beta F_2) / b_0$.

В частном случае $\alpha = \beta$ имеем $\gamma(\alpha, \alpha) = 100 / \alpha (D_2 + D_1)$, или $\alpha = 100 / (D_1 + D_2)$. Тогда находим $\eta = (D_2 + D_1) / (A_2 + A_1)$, а биологический эквивалент равен $b_{eq} = 100(F_1 + F_2) / b_0(D_1 + D_2) = 100\eta(F_1 + F_2)(A_1 + A_2) / b_0(D_1 + D_2)^2$.

Оценки светоотдачи η светодиодов и их биологической активности b_{eq} приведены на рис. 1 и в табл. 1 и 2. Предельные значения эффективности наиболее часто используемых люминофоров белых светодиодов

указаны в табл. 1. Изменение биологической активности b_{eq} белых светодиодов с учетом интенсивности гетероструктур разного состава при наличии желтого люминофора YAG: Ce^{3+} приведено в табл. 2. Как видно, биологическая активность белых светодиодов задается интенсивностью и спектральным диапазоном гетероструктуры. Это определяет циркадный эффект применения источника – его мелатониновый фактор.

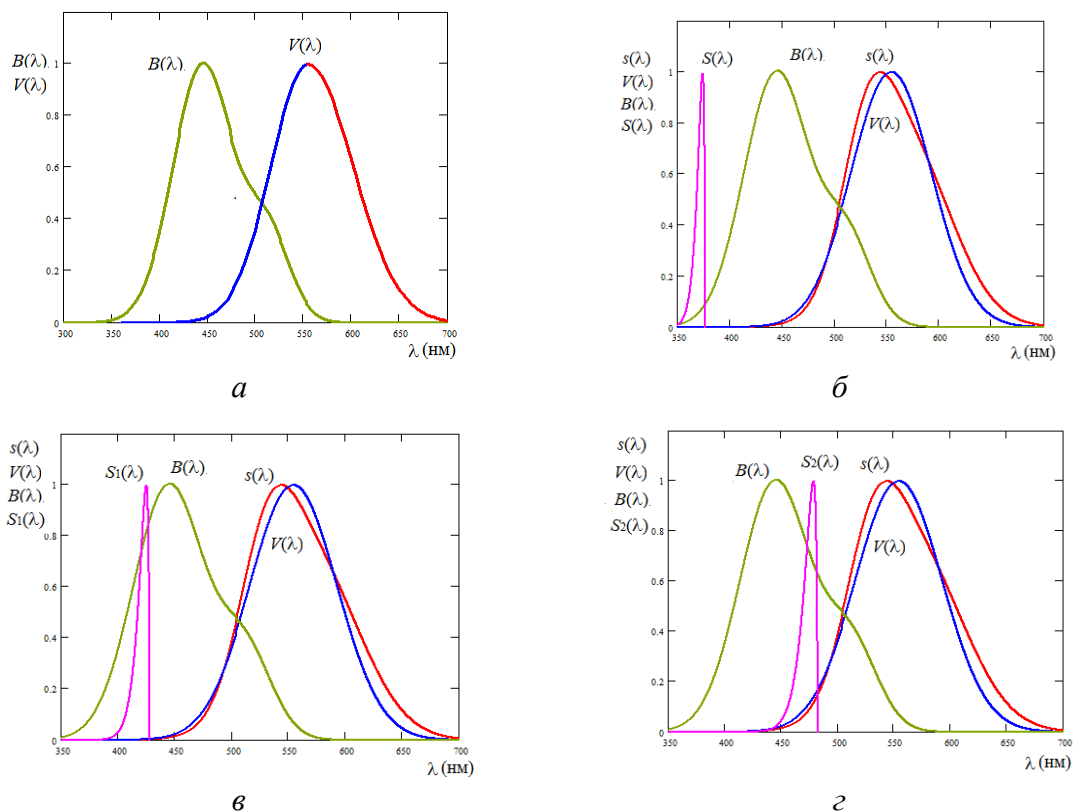


Рис. 1. Функции $V(\lambda)$ и $B(\lambda)$ (а), спектры излучения гетероструктур $S(\lambda)$ и желтого люминофора $s(\lambda)$ (б, в, г)

Таблица 1.
Спектральные характеристики белых светодиодов с люминофорами, $T = 300$ К

Люминофор, цвет	Полоса испускания, λ (нм)	Спектр возбуждения, λ_{max} (нм)	Предельная эффективность, η (лм/Вт)	Биологическая активность, b_{eq} (%)
YAG: Ce^{3+} , yellow	500-620	342; 460	486	102*
β -sialon: Eu^{2+} , green (3)	535	303; 405; 450	532	144**
CaAlSiN ₃ : Ce^{3+} , yellow (1)	570	259; 313; 370; 421; 483	382	42*
Ca- α -sialon: Eu^{2+} , yellow-orange (2)	580	300; 392; 444; 487	469	51*
Sr ₂ Si ₅ N ₈ : Eu^{2+} , red (4)	640	450	211	13*

Таблица 2.

Спектральные характеристики белых светодиодов с желтым люминофором

Гетероструктура, спектр излучения	λ (нм)	$h\nu$ (эВ)	Световая отдача структуры, η (лм/Вт)	Биологическая активность, b_{eq} (%)
GaN-Al _{0.2} Ga _{0.8} N, ультрафиолетовый	376	3.30	7.5×10^{-3}	$2.4 \times 10^{6***}$ (105*)
Ga _{0.9} In _{0.1} N-GaN, фиолетовый	428	2.90	1.6	$1.4 \times 10^{5***}$ (152**)
Ga _{0.8} In _{0.2} N-GaN, голубой	483	2.57	71	$3.3 \times 10^{3***}$ (165**)

Заключение. Проведенные оценки биологической активности светодиодов относятся к потенциальной угрозе с точки зрения мелатонинового фактора. Из-за слабого перекрытия кривой функции $B(\lambda)$ со спектром излучения люминофоров биологическая активность светодиодов получается обычно низкой (оценка применения - * безопасно). Однако из-за излучения ультрафиолетовой и фиолетовой гетероструктур биологическая активность светодиодов при нормировке 100 лм получается достаточно высокой (оценки применения: ** нежелательно и *** опасно).

1. Xie R.-J., Li Y.Q., Hirotsaki N., Yamamoto H. Nitride Phosphors and Solid-State Lighting. N.Y., 2011. 329 p.
2. Led Lighting: Technology and Perception / Eds. Khanh T. Q., Bodrogi P., Vinh Q. T., Winkler H. Weinheim, 2014. 493 p.
3. Закгейм А. Л. // Светотехника. 2012. № 6. С. 12–21.
4. Brainard G. C., Hanifin J. P., Greeson J. M. et al. // J. Neurosci. 2001. Vol. 21, No. 16. P. 6405-6412.
5. Thapan K., Arendt J., Skene J. D. // J. Physiol. 2001. Vol. 535, No. 1. P. 261-267.
6. Аладов А. В., Закгейм А. Л., Мизеров М. Н., Черняков А. Е. // Светотехника. 2012. № 3. С. 7–10.
7. Бижак Г., Кобав М. Б. // Светотехника. 2012. № 3. С. 11-16.
8. Леонидов А. В. // Светотехника. 2011. № 3. С. 69-70.
9. Gall D, Bieske K. // CIE Sympos.'04 "Light and Health". Vienna, 2004. P. 129-132.
10. Lang D. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8278. P. 827803-1-827803-10.
11. Žukauskas A., Vaicekauskas R., Vitta P. // Appl. Opt. 2012. Vol. 51, No. 35. P. 8423-8432.
12. Zakgeim A. L., Chernyakov A. E., Vaskou A. S. et al. // Proc. 14th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2013. Wroclaw, 2013. P. 1/7–7/7.
13. Koponen V. K. // Сб. докл. Междунар. науч. конф. ФТТ-2007. Т. 2. Минск, 2007. С. 42–46.
14. Koponen V. K. // XII Междунар. симпоз. "Нанопизика и наноэлектроника". Т. 2. Н. Новгород, 2008. С. 485–486.